

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 766 274

(21) N° d'enregistrement national :

98 08994

(51) Int Cl⁶ : G 01 R 31/11

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 13.07.98.

(30) Priorité : 11.07.97 FR 09708850.

(71) Demandeur(s) : APPLICATIONS TECHNIQUES ETUDES REALISATIONS MECANIQUES ELECTRONIQUES SYSTEMES - ATERMES — FR.

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 22.01.99 Bulletin 99/03.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

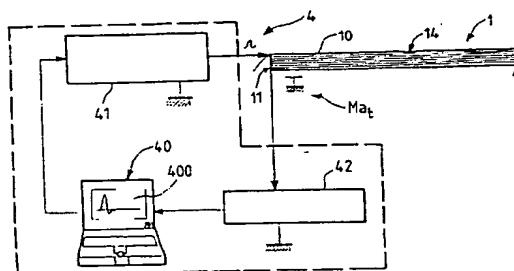
(72) Inventeur(s) : PLAT DOMINIQUE.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : THIBON LITTAYE.

(54) PROCÉDÉ DE LOCALISATION DE DÉFAUTS SUR UN CÂBLE MÉTALLIQUE ET DISPOSITIF DE MISE EN ŒUVRE DE CE PROCÉDÉ.

(57) L'invention concerne un procédé de localisation de défauts (14) le long d'un câble métallique multipaires (1) comprenant un écran électrostatique (11) et une gaine externe isolante (10). Les défauts (14) sont provoqués par une altération de la gaine (11) et la modification de ses caractéristiques diélectriques. On injecte une impulsion, de préférence Gaussienne, entre l'écran électrostatique (11) et le milieu (M_{at}) entourant le câble (1). Les défauts (14) provoquent une interaction électromagnétique entre l'écran (11) et ce milieu (M_{at}), et une réflexion de l'onde se propageant dans l'écran (11). L'analyse temporelle des signaux permet de détecter la présence d'échos et de localiser les défauts (14). Le procédé comprend la modélisation du câble (1) selon plusieurs configurations standards: câble enterré, sous conduite et aérien, en fonction des caractéristiques physiques du milieu.



PROCEDE DE LOCALISATION DE DEFAUTS SUR UN CABLE METALLIQUE ET DISPOSITIF DE MISE EN OEUVRE DE CE PROCEDE

La présente invention concerne un procédé de localisation de défauts sur un câble métallique d'un réseau de communication, plus particulièrement un procédé de localisation de défauts sur un câble métallique téléphonique multipaires.

L'invention concerne également un dispositif pour la mise en oeuvre de ce procédé.

10 Dans ce qui suit, et sans que cela limite en quoi que ce soit la portée de l'invention, on considérera le cas d'un réseau téléphonique de distribution locale par câble métallique multipaires.

En effet, pour les réseaux téléphoniques de distribution locale, il existe deux types de câbles principaux : les câbles à paires métalliques torsadées et les câbles à fibre optique. Les seconds peuvent, *a priori*, transporter un plus grand nombre d'informations simultanément. Cependant, les systèmes à fibres optiques coûtent beaucoup plus chers que les systèmes traditionnels à paires métalliques et sont plus complexes de mise en oeuvre. En outre, si on ne considère pas le cas des artères à haut débit, mais les réseaux de distribution locale précités, des techniques performantes de communication permettent d'augmenter très fortement le débit des paires torsadées. A titre d'exemple non exhaustif, on peut citer les techniques "HDSL" et "ADSL". Ces techniques rendent finalement peu attractif le recours aux réseaux à fibres optiques, ce d'autant plus que le parc classique de câbles métallique existant est très important. Il a été estimé à environ 140 milliards de francs pour la France.

Le besoin se fait donc sentir de maintenir en état ne serait-ce que ce parc existant. De façon plus précise, il est avantageux d'effectuer une maintenance prédictive, c'est-à-dire qui permet notamment de détecter et, surtout, 5 localiser à l'avance l'apparition d'un défaut à un endroit précis d'un câble de transmission.

Comme illustré sur la figure 1 placée en annexe de la présente description, un câble de transmission 1 comprend habituellement les éléments suivants : une gaine extérieure 10, étanche et électriquement isolante, par exemple en polyéthylène, et un écran électrostatique tubulaire 11, à l'intérieur duquel sont disposées des dizaines, voire des centaines de paires torsadées 12, véhiculant les signaux à transmettre. Pour des raisons de simplification des dessins, 15 on n'a représenté que les deux paires extrêmes : p_1 et p_n , n étant le nombre total de paires. L'écran électrostatique 11 est réalisé, par exemple, à partir d'un ruban d'aluminium mince (typiquement de 80 μm d'épaisseur), enroulé en spires jointives. Cet écran 11 est couramment appelé "Alupe" en 20 termes de métier.

Il existe trois configurations principales de câble : les câbles en pleine terre, les câbles en conduite enterrée, la conduite étant réalisée par exemple en polychlorure de vinyle ("PVC"), et les câbles aériens.

25 Quelle que soit la configuration des câbles, il existe deux grandes sources de défauts.

Le premier type de défauts, le plus courant (environ 80 % des cas), est d'origine mécanique et concerne les épissures dans les boîtes de raccordement, aériennes ou 30 enterrées. L'origine de ces défauts est diverse : vibrations (proximité d'une route ou d'une voie ferrée), rongeurs, agression permanente de l'eau ou tensions mécaniques introduites lors de la pose des câbles. Ces défauts sont

généralement facilement localisables, notamment pour les câbles enterrés ou en conduite, car les infiltrations d'eau dans le manchon conduisent à des anomalies. L'invention n'est pas concernée par ce type de défauts.

5 Le second type de défauts concernent des altérations du câble proprement dit. Il s'agit de défauts qui apparaissent le long de celui-ci.

On conçoit aisément que, même pour des câbles aériens, ces défauts ne sont généralement pas détectables 10 par une simple inspection visuelle (par ailleurs impossible pour des câbles enterrés).

Un câble présente un jeu de paramètres physiques qui permet de le caractériser : permittivité, conductance, impédance caractéristique, etc. Ces paramètres peuvent être 15 "vus" des extrémités d'un câble. En d'autres termes, lorsqu'il y a apparition d'un défaut ou d'une altération le long du câble, il se produit une variation locale de certains de ces paramètres qui se répercute ou, pour le moins, peut être mesurée ou détectée aux extrémités du 20 câble.

On pourrait penser modéliser le comportement d'un câble comme préalable à des simulations d'agressions diverses sur ce câble. Les données collectées, associées à chaque type d'agressions, permettraient de caractériser les 25 défauts en résultant et, éventuellement, de donner la possibilité de localiser l'endroit d'apparition du défaut.

Cependant, jusqu'à une période récente, l'approche mathématique était réduite du fait des moyens de calculs automatiques restreints disponibles, les phénomènes mis en 30 jeu étant très complexes. Seules des méthodes par expérimentation et/ou observation pouvaient être mises en oeuvre.

L'apparition d'outils informatiques très puissants, miniaturisés et relativement bons marché, a modifié cette approche. Cependant, si la modélisation d'un câble simple, par exemple coaxial, ou d'une paire simple est maintenant tout à fait réalisable par ces moyens, la modélisation de câbles beaucoup plus complexes, comportant des dizaines, voire des centaines de paires, reste encore hors de portée de ces outils informatiques, dans des temps et pour des coûts réalistes. En effet, chaque conducteur étant couplé à ses voisins, le nombre de paramètres interdépendants et le niveau de complexité qui en résulte rendent la charge de calcul prohibitive.

Il faut en outre créer des modèles pour chacune des configurations de câble rappelées (enterrée, sous conduite ou aérien) et, pour chacun de ces modèles, des sous-modèles tenant compte, sinon de toutes les conditions possibles, mais au moins d'un jeu significatif de conditions typiques du milieu ambiant dans lequel est plongé le câble. Il suffirait en effet de simuler et étudier certains cas aux limites, difficiles, onéreux, longs voire impossibles à recréer dans la réalité et de mesurer le comportement correspondant du câble.

Il existe cependant une hypothèse simplificatrice possible. La très grande majorité des altérations du câble, statistiquement constatées, est due à des dégradations de sa couche superficielle, c'est-à-dire de la gaine de protection : porosité, etc.

Dans des conditions que l'on peut qualifier de "normales" de fonctionnement (câble intact), l'écran électrostatique est isolé du milieu ambiant. Lorsque des dégradations de la gaine de protection apparaissent, brutalement ou de façon progressive, c'est-à-dire un régime "anormal", il y a apparition corrélative de phénomènes électromagnétiques entre l'écran électrostatique et le

milieu ambiant, puisque cet écran n'est plus isolé par la gaine, ou pour le moins le degré d'isolation descend en dessous d'un seuil donné.

Or, en étudiant ces phénomènes, la Demanderesse a pu 5 établir, de façon surprenante, qu'il était possible de modéliser le comportement d'un câble multipaires simplement en étudiant et en mesurant la propagation d'ondes sur l'écran électrostatique, et non sur une et/ou plusieurs paires.

10 L'invention tire parti de ces observations et propose un procédé de localisation d'un défaut le long d'un câble multipaires.

Pour ce faire, il est fait usage d'une méthode de réflectométrie, connue *per se*, consistant à injecter un 15 signal à une extrémité d'un câble et à étudier les caractéristiques du signal en retour, après des réflexions, éventuellement multiples, soit seulement en bout de la ligne à constantes réparties que forme le câble (s'il n'y a pas de défauts intermédiaires), soit précisément sur les 20 singularités que forment les défauts.

Selon une caractéristique principale de l'invention, on injecte ce signal entre l'écran électrostatique et le milieu ambiant (terre, etc.).

Dans un mode de réalisation préféré, on met en 25 oeuvre une technique de réflectométrie temporelle en injectant un signal de très courte durée par rapport au temps nécessaire à sa propagation le long du câble.

Toujours dans un mode de réalisation préféré, on utilise une impulsion de forme Gaussienne.

Selon une autre caractéristique de l'invention, on effectue un traitement mathématique du signal réfléchi. En effet, dans un grand nombre de situations, le signal réfléchi sera bruité. A titre d'exemples, le milieu ambiant 5 peut être intrinsèquement soumis à des perturbations électromagnétiques intenses ou, si le défaut de la gaine est léger, l'écho qui en résulte est tenu et, *a priori*, bruité. Pour extraire les informations utiles du bruit, le signal réfléchi est soumis à une étape de traitement par auto 10 corrélation, ou de façon préférentielle à une étape de traitement par intercorrélation.

Le procédé selon l'invention permet de localiser un défaut sur un câble avec une grande précision. Cependant, dans certaines configurations, la précision obtenue peut 15 s'avérer insuffisante. Il est alors nécessaire de procéder à des travaux importants pour remonter effectivement jusqu'au défaut. Ceci concerne plus particulièrement les câbles enterrés. Il est particulièrement important que la zone de câble comportant un défaut soit déterminée avec la plus 20 grande précision possible, pour éviter d'avoir à déterrer un tronçon de câble de grande longueur.

Aussi, selon un aspect complémentaire du procédé de l'invention, une fois le défaut localisé, avec une précision déterminée, il est possible de procéder à une étape 25 supplémentaire consistant à mesurer le champ électromagnétique rayonné par le câble, lorsqu'on injecte un signal électrique à son entrée. On peut ainsi rendre plus précise la localisation du défaut le long du câble et réduire la zone d'incertitude à son strict minimum.

30 L'invention a donc pour objet un procédé de localisation d'au moins un défaut le long d'un câble métallique multipaires, ledit câble comprenant une pluralité de paires de fils conducteurs destinées à véhiculer des signaux d'information, un écran électrostatique conducteur

de l'électricité entourant ces paires et une gaine externe en matériau électriquement isolant, ledit câble étant plongé dans un milieu déterminé, caractérisé en ce qu'il comprend au moins les étapes suivantes :

- 5 - génération d'une impulsion électrique, de forme, d'amplitude et de durée déterminées ;
- 10 - injection de cette impulsion, en une première extrémité dudit câble, entre ledit écran électrostatique et le matériau constituant ledit milieu déterminé, de manière à obtenir la propagation d'une onde électromagnétique le long dudit écran électrostatique ;
- 15 - analyse temporelle des signaux électriques apparaissant à ladite première extrémité du câble, sur une période déterminée, pour détecter la présence d'échos correspondant à des réflexions de ladite onde électromagnétique sur ledit défaut, ce défaut se traduisant par des interactions entre ledit écran électrostatique et ledit milieu déterminé ;
- 20 - et détermination de la distance séparant ledit défaut de ladite première extrémité de câble à partir du temps nécessaire à ladite onde électromagnétique pour se propager jusqu'au dit défaut et retourner à ladite première extrémité et de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le câble.
- 25 L'invention a encore pour objet un dispositif de localisation de défaut le long d'un câble métallique multipaires, pour la mise en oeuvre de ce procédé.

L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques et avantages apparaîtront à la lecture de 30 la description qui suit en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

- la figure 1 illustre schématiquement un exemple de câble métallique multipaires ;
 - la figure 2 illustre schématiquement un modèle simplifié de ce câble ;
- 5 - la figure 3 illustre schématiquement un modèle de câble conforme au procédé selon l'invention ;
- les figures 4a à 4d illustrent ce même modèle, complété pour tenir compte de différentes configurations particulières de câbles ;
- 10 - les figures 5a à 5c illustrent ces mêmes modèles affectés de défauts et tenant compte des caractéristiques du milieu dans lequel ils sont plongés ;
- les figures 6a à 10b sont des diagrammes de fonctions explicitant le procédé de l'invention ;
- 15 - la figure 11 illustre un exemple d'un dispositif de localisation de défaut le long d'un câble métallique multipaires, pour la mise en oeuvre du procédé de l'invention ;
- et les figures 12a et 12b illustrent une variante supplémentaire du procédé selon l'invention permettant de localiser un défaut de façon plus précise.

Le procédé de localisation de défaut dans un câble métallique multipaires comprend essentiellement les deux phases suivantes :

- 25 La première phase, ou phase préliminaire, consiste à définir des modèles pour les configurations principales de câbles métalliques multipaires qui ont été rappelées, et corrélativement des défauts apparaissant sur ces câbles, et à effectuer des simulations permettant de déterminer les
- 30 caractéristiques des câbles soumis à des altérations, dans des conditions de mesures différentes. Cette phase permet d'acquérir des données caractéristiques à chacun des

modèles, et donc au comportement des câbles métalliques multipaires associés à ces modèles.

La deuxième phase ou phase de mesure des signaux sur le câble met en œuvre une technique de réflectométrie et se 5 déroule comme suit :

- injection d'un signal en extrémité de câble, entre l'écran électrostatique et le milieu ambiant ;
- mesure des signaux sur le câble.

La deuxième phase peut être complétée par un 10 traitement mathématique des signaux qui sera précisé ci-après.

On va maintenant détailler ces différentes phases.

Concernant la première phase, la modélisation d'un câble simple, monopaire ou coaxial est devenue possible avec 15 les ressources informatiques puissantes actuellement disponibles. Elle consiste à appliquer la théorie de la propagation des ondes, c'est-à-dire résoudre l'équation dite "des télégraphistes", pour reproduire le comportement réel du câble.

20 Lorsque le câble devient plus complexe (des dizaines ou des centaines de paires), ce qui est le cas des câbles métalliques multipaires considérés dans le cadre de l'invention, la modélisation fine devient inexploitable. Chaque conducteur est en effet couplé à ses voisins et le 25 nombre de paramètres interdépendants (plusieurs milliers) devient prohibitif.

Il est alors illusoire de chercher à modéliser finement un câble comportant un grand nombre de paires.

L'expérience a montré qu'il était suffisant de ne considérer qu'une seule des paires, et de simuler les autres par un conducteur plein unique. Le diamètre de ce conducteur plein est l'équivalent "cuivre" des autres paires.

5 Le modèle simplifié Ms du câble devient celui illustré par la figure 2. Il se décompose, comme un câble réel, en une gaine 10 et un écran électrostatique 11, ou blindage. Cependant, l'ensemble des paires 12 peut être simulé par une paire unique px (x étant un indice arbitraire
 10 compris entre 1 et n) et le conducteur plein unique précité, référencé 120.

Le modèle représenté sur la figure 2 n'est intéressant que si les conducteurs internes (paires) peuvent être utilisés pour la détection et la localisation d'un
 15 défaut du câble.

Or, l'expérimentation a également montré, de façon surprenante, qu'il fallait prendre en compte, non pas les paires internes 12, mais l'écran électrostatique 11, et seulement cet écran électrostatique, pour être en mesure de
 20 détecter un défaut au niveau de la gaine isolante 10, et surtout de le localiser.

L'expérience a en effet montré que la propagation d'ondes sur cet écran électrostatique 11 n'était pas affectée par la présence des paires internes 12.

25 Le modèle Mo conforme au procédé selon l'invention, et illustré par la figure 3, peut donc se résumer à un écran électrostatique 11 et à une gaine isolante 10, ces deux éléments étant entourés par le matériau constituant le milieu extérieur ambiant Ma. L'écran électrostatique 11
 30 entoure lui-même un matériau diélectrique 13 simulant l'intérieur du câble.

Ce modèle est donc particulièrement simple. Pour fixer les idées, on va considérer dans ce qui suit que le diamètre de l'écran électrostatique 11 est de 5,56 mm (celui-ci formant un tube d'aluminium, dont la paroi est 5 dotée d'une épaisseur de 80 μm), que le diamètre extérieur du câble (gaine 10) est de 7,1 mm et que les matériaux diélectriques interne et externe à l'écran électrostatique 11 ont une constante diélectrique égale à 2,3.

Dans la réalité, ce modèle de base Mo peut se 10 décliner en trois "sous-modèles" principaux, selon que l'on considère une des trois configurations de câble métallique multipaires : enterrée, sous conduite ou aérienne. Il est en effet nécessaire de modéliser également l'environnement, c'est-à-dire le milieu ambiant, qui diffère fortement d'une 15 configuration à l'autre.

La figure 4a illustre le modèle standard Mot d'un câble métallique multipaires enterré, le milieu ambiant Mat étant constitué par de la terre. Il est naturellement nécessaire de retenir quelques hypothèses simplificatrices.

Le câble en pleine terre est supposé être enfoui à 20 une profondeur de 1 mètre environ (ce qui correspond à la "Norme FT"). Cette valeur est importante dans la modélisation, car elle définit la quantité de matière qui est "vue" par l'onde électromagnétique injectée dans l'écran électrostatique 11 (comme il le sera précisé dans ce qui 25 suit), lors de son parcours le long du câble 1.

La terre formant le milieu ambiant Mat est supposée homogène. Sa conductance σ_T et sa permittivité ϵ_{rT} sont des paramètres variables simulant les différentes couches 30 géologiques et l'humidité.

La figure 4b illustre le modèle standard Moc d'un câble métallique multipaires en conduite enterrée. Le câble

12

en conduite enterrée n'est pas en contact direct avec la terre. Il est disposé dans une conduite 2, en matériau synthétique (par exemple en polychlorure de vinyle), d'un diamètre typique de 80 mm. Cette conduite 2 est supposée 5 être remplie d'eau (milieu ambiant Mae). La présence de l'eau est fréquente et est très importante pour une onde électromagnétique en tant qu'élément conducteur à grande permittivité. On a référencé, sur la figure 4b, σ_T et ϵ_{rT} , la conductance et la permittivité de l'eau.

10 La figure 4c illustre schématiquement un câble métallique multipaires aérien réel 1'. Il comprend, comme précédemment, une pluralité de paires 12, un écran électrostatique 11 et une gaine 10. Cette dernière comporte une poche ou un conduit 100 dans lequel est enfilé un filin 15 ou câble porteur 3, habituellement en acier. Les extrémités de ce câble 3 sont fixées à des poteaux téléphoniques (non représentés).

L'expérience a montré que le câble porteur 3 n'influence pas la propagation des ondes, comme c'est le cas 20 pour les paires internes, et peut être ignoré. Le modèle équivalent à un câble métallique multipaires aérien se ramène donc au modèle du câble en pleine terre, c'est-à-dire celui représenté sur la figure 4a, mais avec de l'air comme milieu ambiant.

25 Cependant, le point critique de la modélisation d'une telle configuration de câble réside dans le fait que l'air, en fonction de l'heure, du jour et de la saison, possède des caractéristiques diélectriques très différentes.

A titre d'exemple, il est préférable de rechercher 30 les défauts, au petit matin, lorsque le câble est recouvert d'une fine couche de rosée : $e = 0,5$ mm par exemple. La permittivité du milieu ambiant Moar est donc celle de l'eau ϵ_{rEau} et sa conductivité σ_{Eau} .

La figure 4d illustre le modèle standard Moar d'un câble métallique multipaires aérien dans les conditions énoncées ci-dessus, c'est-à-dire entouré de rosée (milieu ambiant Maar).

5 La modélisation conforme à l'invention des différentes configurations de câble ayant été précisée, il reste à modéliser les défauts rencontrés.

Tout d'abord, comme il a été indiqué, seuls les défauts rencontrés le long du câble, et plus précisément 10 ceux dus aux altérations de la gaine isolante 11, sont concernés par le procédé de localisation de défauts de l'invention.

Les défauts constatés le long d'un câble, qu'il soit en pleine terre, en conduite enterrée ou aérien, sont 15 d'origines variées comme indiqué ci-dessous :

Une pierre, une pioche, un engin de travaux publics ou un rongeur peut léser la gaine polyéthylène extérieure du câble. A terme, cette lésion en présence de l'eau, va se traduire par un contact plus ou moins franc de l'écran 20 électrostatique avec le milieu extérieur. Il s'ensuit une perturbation du réseau.

Une branche au cours d'un orage, ou, tout simplement, du fait de sa croissance, va user la gaine polyéthylène du câble aérien. Lors d'une prochaine pluie, un 25 défaut d'isolation sera détectable.

Des plombs de chasse sont également à l'origine de blessures des gaines polyéthylène.

Il est utile de rappeler que dans le cadre de l'invention, un défaut est défini comme une altération des 30 caractéristiques isolantes de la gaine extérieure 10 du

câble 1, car statistiquement, il a été constaté que ces altérations constituaient la cause principale de ce type de défaut (défaut le long du câble 1). La gaine extérieure 10 ne constitue donc plus un isolant parfait et la partie 5 blessée peut être alors imprégnée d'humidité.

Un défaut peut donc être modélisé comme une variation locale des caractéristiques diélectriques de la gaine extérieure 10 du câble 1.

La longueur l_d d'un défaut est paramétrable, et la 10 permittivité et la résistivité du défaut sont paramétrables également.

Si on appelle σ_d la "résistivité du défaut", typiquement cette résistivité est comprise dans la gamme allant de $\sigma_d=10^{-1}$ à $\sigma_d=10^{-4}$. Puisque, *a priori*, l'altération 15 de la gaine 10 s'accompagne d'une pénétration plus ou moins importante d'eau, la "permittivité du défaut" est choisie égale à celle de l'eau soit: $\epsilon_{rd} = 10$. On obtient alors trois modèles principaux ou standards complets, modèles rendant compte de la présence d'un défaut référencé 14. Ces 20 modèles sont illustrés, respectivement, par les figures 5a à 5c.

Les éléments communs aux figures précédentes portent les mêmes références et ne seront redécrits qu'en tant que de besoin.

25 La figure 5a illustre schématiquement un modèle standard complet Most d'un câble enterré 1 et présentant un défaut localisé 14, c'est-à-dire une altération du matériau de la gaine isolante 10. La conductivité de l'écran électrostatique 11 est référencée σ_b et la permittivité de 30 la gaine 10 est référencée ϵ_{rg} . Les autres paramètres ont été définis précédemment. On suppose enfin, comme précédemment, que le câble 1 est enfoui à une distance l

(par exemple $l=1$ m) de la surface du sol Ss. La longueur du défaut 14 est l_d .

La figure 5b illustre schématiquement un modèle standard complet Mosc d'un câble 1, sous conduite 2 et 5 comportant un défaut 14 de longueur l_d . Les différents paramètres de conductivité et permittivité ont déjà été définis.

La figure 5c illustre schématiquement un modèle standard complet Mosa d'un câble aérien 1' comportant un 10 défaut 14 de longueur l_d . Les différents paramètres de conductivité et permittivité ont déjà été définis. Le câble 1' est supposé être disposé à une hauteur h (par exemple $h = 3$ m) par rapport à la surface du sol Ss.

Ces modèles étant définis, on va simuler leur 15 comportement en étudiant la propagation d'une onde électromagnétique le long du câble 1, ou plus précisément le long de l'écran électrostatique 11. Cette étude revient à résoudre l'équation dite des "télégraphistes", issue de l'équation de Maxwell, pour des jeux de conditions 20 variables et correspondant aux modèles précités. Pour ce faire, on peut utiliser des outils informatiques à logique programmée. Des logiciels spécialisés permettent, notamment, d'effectuer de tels calculs.

Les données collectées permettront ensuite de 25 tester, en grandeur réelle, des câbles physiques répondant, *a priori*, à l'un ou l'autre des modèles, dans des conditions préétablies. La localisation des défauts pourra s'effectuer comme il le sera précisé ci-après.

On peut cependant indiquer dès à présent que l'on 30 met en oeuvre une méthode basée sur la réflectométrie, méthode connue en soi, qui consiste à injecter un signal à une première extrémité d'une ligne de transmission à

16

constantes réparties, et à analyser et mesurer les caractéristiques du signal réfléchi, par l'autre extrémité de la ligne et/ou par des discontinuités rencontrées par l'onde le long de la ligne.

5 Dans l'art connu, on fait se propager l'onde entre des fils actifs véhiculant les signaux à transmettre, par exemple les deux fils d'une paire, ou entre l'âme et la tresse de masse d'un câble coaxial.

10 Tout au contraire, selon une des caractéristiques principales de l'invention, le signal est injecté entre le milieu ambiant (terre, air ou eau selon les configurations de câble) et l'écran électrostatique 11.

15 En réalité, il existe deux méthodes principales de réflectométrie : la réflectométrie dans le domaine fréquentiel et la réflectométrie dans le domaine temporel.

Selon que l'on recourt à l'une ou à l'autre de ces techniques, l'onde injectée consiste, soit en une onde sinusoïdale variable en fréquence, soit en une impulsion électrique brève.

20 Dans le domaine fréquentiel, on s'intéresse à l'amplitude et à la phase de l'onde le long du câble et aux perturbations apportées sur celles-ci par la présence du défaut 14.

25 Cependant les simulations et mesures montrent que l'interprétation des résultats dans ce domaine fréquentiel s'avère très vite délicate et compliquée.

Dans le domaine temporel l'écho réfléchi par le défaut 14 est porteur d'informations claires sur la position de celui-ci.

Aussi, dans un mode de réalisation préférentiel du procédé selon l'invention, on retient cette technique temporelle et seule celle-ci sera décrite ci-après.

L'onde électromagnétique se propageant sur l'écran 5 électrostatique 11 "communique" avec le milieu extérieur du fait de pertes diélectrique et résistive. Au niveau du défaut 14, il y a discontinuité dans la propagation de l'onde. Cette discontinuité se traduit par un retour d'énergie vers la source ou écho. Cet écho est porteur 10 d'informations sur la gravité du défaut et sur sa position le long du câble.

Des impulsions de formes diverses, notamment rectangulaires, trapézoïdales, ou sinusoïdales sont tout à fait utilisables dans le cadre de l'invention. Cependant, 15 dans un mode de réalisation préféré de l'invention, on choisit une impulsion de forme gaussienne qui présente un certain nombre d'avantages, comme il le sera montré ci-après.

En effet une impulsion de forme gaussienne lors de 20 sa propagation le long du câble 1, et plus particulièrement de l'écran électrostatique 11, et lors de sa réflexion sur le défaut 14, a la caractéristique avantageuse de conserver, à tout moment, ses caractéristiques de Gaussienne. Ce n'est pas le cas pour d'autres formes d'impulsions, comme les 25 impulsions de forme rectangulaire, trapézoïdale ou sinusoïdale. En effet, l'intégration, dans le câble 1 d'une impulsion de ce type, modifie considérablement la forme et la phase de cette impulsion et il devient alors très difficile, voire impossible de conserver des références 30 liées à la forme, pour localiser le temps d'aller et retour vers le défaut 14, donc de localiser ce défaut 14 avec précision.

L'équation mathématique d'une Gaussienne centrée sur l'axe des abscisses, est la suivante :

$$y = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

A titre d'exemple, sa représentation graphique pour 5 $\sigma = 10$ (axe des X) est illustrée par la figure 6a. L'axe vertical Y donne l'amplitude de la courbe normalisée à l'unité.

Dans la réalité, la forme d'onde démarre à $t=0$ et a une durée à la base de 3 μs environ, comme représenté sur la 10 figure 6b. Pour fixer les idées, on choisit une impulsion dont la largeur à mi-hauteur est typiquement de 2,4 μs . L'axe horizontal t est l'axe des temps (en μs) et l'axe vertical A est l'axe des amplitudes du signal, normalisé à l'unité.

15 C'est ce signal qui est injecté à l'entrée du câble 1, entre le milieu ambiant et l'écran électrostatique 10.

Dans une ligne de transmission sans défauts, la seule discontinuité rencontrée par l'onde injectée est 20 l'impédance de terminaison de la ligne. Il y a donc réflexion de l'onde vers l'entrée de la ligne. La mesure du temps nécessaire à un aller et retour permet de déterminer la longueur de la ligne, connaissant ses caractéristiques. Comme il est connu, il existe une exception à ce 25 fonctionnement. En effet, lorsque la ligne est refermée sur une impédance égale à son impédance caractéristique, toute l'énergie véhiculée par l'onde est absorbée sur cette terminaison. On dit qu'il y a adaptation.

Dans les autres cas, il y a donc réflexions et, 30 éventuellement réflexions multiples (plusieurs aller et

19

retour de l'onde), jusqu'à ce que l'affaiblissement accompagnant ces trajets soit suffisant pour que les appareils de mesure utilisés ne puissent plus détecter les échos.

5 Ce phénomène existe également lorsqu'on rencontre des discontinuités le long de la ligne. Comme il a été indiqué, l'écran électrostatique 11 se comporte comme une ligne à constantes réparties. Si la gaine 10 est altérée à un endroit quelconque du câble 1, il apparaît un défaut 14, 10 ce qui va avoir pour conséquence de perturber la propagation de l'onde. Il se produit alors une réflexion prématuée de l'onde. L'étude et la mesure du signal réfléchi va donc permettre de localiser le défaut 14 (le temps d'aller et retour étant raccourci), et sa gravité (en mesurant 15 l'amplitude des échos).

Cependant, lorsque le défaut 14 du câble 1 est léger, l'écho sera tenu et vraisemblablement bruité. Le milieu ambiant peut être également intrinsèquement très bruité. Aussi, dans un mode de réalisation préféré de 20 l'invention, pour déterminer avec la précision requise la position du défaut le long du câble, on soumet le signal à un traitement mathématique pour extraire du bruit les données utiles.

Il existe de nombreuses méthodes d'extraction d'un 25 signal pollué et même noyé dans le bruit, méthodes utilisées par exemple dans les techniques radar, dans la radioastronomie ou dans la sismologie.

Une de ces méthodes est particulièrement adaptée dans le cas présent : il s'agit de l'autocorrélation et de 30 l'intercorrélation.

La fonction d'autocorrélation d'une fonction s'écrit pour un signal réel $x(t)$ comme suit :

20

$$\Gamma_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t-\tau)dt \quad (2)$$

L'autocorrélation mesure la "ressemblance" entre le signal injecté $x(t)$ et sa stricte copie décalée après un décalage temporel τ .

5 Comme il est bien connu, les propriétés de la fonction d'autocorrélation sont les suivantes :

- elle présente une parité : $\Gamma_x(\tau) = \Gamma_x(-\tau)$;
- la fonction d'autocorrélation d'un signal aléatoire centré (signal auquel on a soustrait sa valeur moyenne) tend vers 0 lorsque τ augmente indéfiniment : $\Gamma_x(\infty) = 0$;
- 10 - La fonction d'autocorrélation est maximale pour $\tau = 0$: $|\Gamma_x(\tau)| \leq \Gamma_x(0)$.

15 On en conclut que c'est un moyen pratique et efficace de calculer le déphasage entre les deux ondes. Or dans le cadre de l'application visée par l'invention, le déphasage est directement lié à la position du défaut.

Il est également connu par la théorie du traitement 20 du signal que la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation d'un signal $x(t)$ est strictement équivalente à sa densité spectrale énergétique, soit :

$$TF[\Gamma_x(\tau)] = |f(\nu)|^2 \quad (3) ;$$

ou, ce qui est équivalent, que la transformation de Fourier inverse de la densité de la densité spectrale énergétique 25 $|f(\nu)|^2$ est égale à la fonction d'autocorrélation.

On sait par ailleurs que la transformée de Fourier d'une Gaussienne est une Gaussienne, soit :

$$TF \left[e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \right] = \sigma \sqrt{2\pi} e^{-2\pi^2 \sigma^2 v^2} \quad (4)$$

On en déduit immédiatement que le résultat de l'autocorrélation est également une fonction Gaussienne dont l'écart type est multiplié par un facteur $\sqrt{2}$ par rapport à la fonction initiale. Or, l'impulsion sélectionnée pour un mode de réalisation préféré du procédé selon l'invention a une forme Gaussienne.

En pratique l'onde réfléchie par l'écho n'est pas strictement identique à sa génitrice : c'est bien sûr une Gaussienne, d'amplitude plus faible, mais dont l'écart type σ est légèrement plus grand.

Il est donc plus exact de parler dans ce cas intercorrélation.

Selon le procédé de l'invention, on effectue une intercorrélation entre le signal injecté $x(t)$ et son écho $e(t)$, mesuré à l'entrée du câble blessé. En d'autres termes, on recherche, à l'aide d'un outil mathématique, la "ressemblance" entre le signal injecté $x(t)$ et son écho mesuré et analysé $e(t)$.

L'avantage de cette approche est que tous les bruits non corrélés présents dans les signaux $x(t)$ et $e(t)$ sont minimisés, comme il le sera montré ci-après dans des exemples pratiques.

Mathématiquement, l'intercorrélation $\Gamma_{xe}(t)$ pour les deux signaux réels $x(t)$ et $e(t)$ est ainsi définie :

$$\Gamma_{xe}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e(t-\tau)dt \quad (5)$$

Cette fonction présente un maximum pour une valeur particulière de τ

Dans l'application, τ représente un décalage temporel entre les deux fonctions, ce décalage temporel 5 étant directement lié au temps mis par l'onde pour se réfléchir sur le défaut. La valeur de τ , exprimée en seconde ou μs est très exactement le temps mis par l'onde électromagnétique pour se propager jusqu'au défaut 14, s'y réfléchir, et revenir à l'entrée du câble 1. Cette valeur 10 de τ , associée à la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique, permet de calculer directement et avec précision la position du défaut 14 par rapport à l'entrée du câble.

On va considérer plus particulièrement le cas de 15 deux impulsions gaussiennes, par exemple les deux signaux x

et y tels que : $x(t) = ae^{\frac{t^2}{2\sigma_x^2}}$ et $y(t) = be^{\frac{t^2}{2\sigma_y^2}}$, avec a et b des constantes de proportionnalité.

La fonction intercorrélation entre ces deux fonctions est équivalente, dans le cas présent, au produit 20 de convolution de ces deux fonctions x et y . On montre alors que le résultat est tel :

$$\Gamma_{xy}(\tau) = ab e^{-\frac{\tau^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}} \quad (6)$$

S'il n'y a aucun décalage temporel entre les deux signaux x et y , la fonction $\Gamma_{xy}(\tau)$ est maximale à 25 l'abscisse 0. Si $y(t)$ est maximale en $t + t_0$, on montre, par un simple changement de variable, que $\Gamma_{xy}(\tau)$ est maximale pour $\tau = t_0$.

23

On va montrer la possibilité de traitement d'un signal bruité par une méthode d'autocorrélation sur un exemple particulier.

On considère un émetteur d'un signal $x(t)$ situé à 5 une distance L d'une surface réflectrice, distance L que l'on veut mesurer. Le signal se propage à la vitesse v . Si on appelle $y(t)$ le signal réfléchi mesuré à l'emplacement de l'émetteur, $y(t)$ est l'image du signal $x(t)$, mais affaibli d'un coefficient c et décalé par rapport à $x(t)$ d'un retard 10 $t_0 = 2L/v$.

Le signal $y(t)$ est supposé noyé dans un bruit de fond "blanc" $B(t)$.

Le signal réfléchi obéit donc à la relation :

$$y(t) = cx(t - t_0) + B(t) \quad (7).$$

15 L'intercorrélation est par définition donnée par la relation suivante :

$$\Gamma_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t - \tau)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)[cx(t - t_0 - \tau) + B(t - t_0 - \tau)]dt \quad (8)$$

L'intercorrélation d'un signal avec un bruit blanc étant nulle, on obtient simplement :

$$20 \quad \Gamma_{xy}(\tau) = c \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - t_0)[x(t - \tau)]dt, \quad (9);$$

soit en changeant de variable et en posant $t' = t - t_0$:

$$\Gamma_{xy}(\tau) = c \int_{-\infty}^{+\infty} x(t')[x(t'(\tau - t_0))]dt' \quad (10),$$

ce qui représente exactement la fonction d'autocorrélation du signal $x(t)$ dont il est connu qu'elle passe par un

24

maximum pour une valeur du temps de corrélation ($\tau - t_0$) égale à 0.

Cette simplification de la fonction intercorrélation en une fonction d'autocorrélation n'est possible que si le 5 signal retour à une forme identique au signal émis. Par contre, ce résultat est valable quel que soit affaiblissement, la forme ou la nature du signal utilisé : sinusoïde, créneaux, Gaussienne, ondes électromagnétiques, sonores, etc.

10 Dans ce cas simple, l'autocorrélation est directement interprétable, et son maximum donne accès à la distance $L = v/2t_0$ recherchée.

Dans le cas du câble 1, l'impulsion de forme 15 Gaussienne injectée garde son caractère gaussien après réflexion sur le défaut. Cependant, il est possible que sa largeur à mi-hauteur ou, ce qui est équivalent, son écart type σ soit modifié, sans pour autant perdre son caractère gaussien. Dans ce cas, l'intercorrélation ne se simplifie plus en auto-corrélation mais, comme il a été montré, 20 l'intercorrélation de deux signaux gaussiens reste gaussienne et la fonction intercorrélation prend la forme simple suivante :

$$\Gamma_{xy}(\tau) = ab e^{-\frac{\tau^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}} \quad (11),$$

de telle sorte que le maximum de la fonction $\Gamma_{xy}(\tau)$ est 25 caractéristique de la position L du défaut, source de l'écho mesuré et analysé, tel que $L = v/2t_0$, t_0 étant la valeur pour laquelle la fonction $\Gamma_{xy}(\tau)$ est maximale.

La Demanderesse a conduit des simulations et des tests sur différentes configurations de câbles, différents

types de défauts, en milieu bruité ou non. Quelques exemples des résultats obtenus vont maintenant être détaillés pour mieux mettre en évidence les caractéristiques importantes du procédé selon l'invention.

5 On va tout d'abord considérer que le milieu est idéal, c'est-à-dire non bruité. A titre d'exemple, on va considérer le cas d'un câble métallique multipaires enterré. Pour ce faire on se reporte de nouveau au modèle de la figure 5a.

10 On effectue les hypothèses suivantes : le défaut 14 est une blessure de la gaine extérieure 10 du câble, située à 100 m de l'entrée, sur une longueur de 10 cm. De ce fait, la gaine est devenue poreuse et s'est imprégnée d'humidité et l'on obtient $\sigma_d = 1 \text{ s/m}$.

15 L'onde mesurée et analysée à l'entrée du câble 1 dans le domaine temporel est illustrée par la courbe du diagramme temporel de la figure 7a. L'axe vertical V représente l'amplitude de l'impulsion d'entrée V_e en Volts et l'axe horizontal est l'axe des temps t , gradué en μs .

20 En réalité, la courbe comprend deux parties bien distinctes : une impulsion unique C_1 de forte amplitude (positive dans l'exemple), et une suite d'impulsions (négatives dans l'exemple), référencées globalement C_2 , d'amplitudes très inférieures et décroissantes. La courbe C_1 25 représente l'impulsion injectée et les différents extrêmes de la courbe C_2 les échos multiples dus à la réflexion de l'onde sur le défaut 14, atténués du fait des pertes subies pendant la propagation.

On constate que l'écho multiple C_2 (plusieurs allers 30 et retours entre le défaut 14 et l'entrée) est bien visible dans ce cas idéal.

De façon pratique, on utilise un oscilloscope ou l'écran d'un micro-ordinateur pour afficher la courbe. Il est alors possible de situer, "à l'oeil", la position du défaut 14 le long du câble 1 avec une assez bonne précision.

5 En effet, l'abscisse peut être graduée en mètres au lieu de micro-secondes, étant donné que la vitesse de propagation du signal le long du câble 1 est connue.

Puisque l'on a considéré que le milieu ambiant était idéal, c'est-à-dire non bruité ou bruité de façon non significative, un traitement mathématique du signal n'est pas nécessaire. Cependant, les échos sont fortement atténusés. En d'autres termes, on peut "extraire" grâce à un traitement par autocorrélation l'écho "noyé" dans l'épaisseur du trait d'abscisse. Une simple "règle de 3" donne alors, en pourcentage, par rapport à la longueur totale du câble 1, la position du défaut 14.

A partir d'un fichier numérique de l'onde illustré sur la figure 7a, obtenu après mesures, et de celui du signal injecté (connu *a priori*), le calcul de la courbe intercorrélation est effectué à l'aide d'un outil informatique approprié, par exemple à l'aide d'un logiciel spécialisé tel que le logiciel mathématique "MATHLAB" (marque déposée).

La fonction intercorrélation, comme le montre le diagramme en YX de la figure 7b, est très pure. Elle comporte comme précédemment deux zones distinctes : un pic C'_1 , centré (dans l'exemple décrit) sur la valeur 2048, et une suite de pics, référencés globalement C'_2 , centrés sensiblement sur les valeurs 1950, 1840 et 1720. Le pic C'_1 est représenté écrêté du fait de sa très forte amplitude.

L'échelle des abscisses X est liée au paramètre τ des formules intercorrélation donc directement liée à l'emplacement du défaut tel que :

$$L=V(\tau/2) \quad (12)$$

L étant la distance du défaut par rapport à l'entrée du câble 1 et V la vitesse de propagation de l'impulsion dans ce câble.

5 Le grand pic, C'_1 , centré sur la valeur 2048 de l'axe des abscisses, est le maximum donné par l'autocorrélation du signal d'entrée sur lui-même (figure 7a : C_1). Ce pic ne contient aucune information sur le défaut.

10 Par contre, les autres pics, C'_2 , centrés sensiblement sur les abscisses $X = 1950, 1840$ et 1720 , apparaissent uniquement à cause de la présence du défaut 14. C'est l'indication claire que des échos multiples "ressemblants" au signal injecté sont présents.

15 Sur la figure 7b, la longueur du câble 1, supposée égale à 1000 m, a été découpée en 2048 éléments. De ce fait τ varie en réalité de -2048 à +2048 ou plus exactement de 0 à 4096.

En d'autres termes, une unité sur l'échelle des
20 abscisses représente 50 cm. Typiquement, la localisation du défaut pourra être effectuée avec une précision de 1 mètre. Elle peut être obtenue en recherchant le maximum mathématique des courbes sur les fichiers de calculs.

Des résultats analogues ont été obtenus pour les
25 autres configurations de câbles et il est inutile de les détailler en totalité. Cependant, la détermination et la localisation d'un défaut peuvent encore être améliorées en utilisant une méthode différentielle.

On va décrire une telle méthode en se plaçant dans
30 le cas d'un câble enterré sous conduite et en se référant de

28

nouveau au modèle de la figure 5b. On suppose, comme précédemment, que le milieu ambiant n'est pas bruité (milieu idéal). On suppose que le défaut 14 est un défaut franc, c'est-à-dire occasionnant une perturbation importante.

5 Afin de rendre maximale la perturbation due au défaut 14, on applique une méthode différentielle : de la signature d'un câble blessé, on soustrait la signature de ce même câble sans blessure. Ainsi, ce sont les variations des caractéristiques électromagnétiques liées au défaut 14, qui
10 sont mises en évidence par intercorrération.

Dans l'exemple décrit par référence à la figure 8, on considère que le défaut 14 a une conductance $\sigma_E = 0,1 \text{ s/m}$, une longueur de 1 cm, car la conduite 2 est supposée remplie d'eau.

15 On constate que, sur la figure 8, le défaut apparaît seul, l'intercorrération du signal injecté avec lui-même n'apparaissant plus.

On va enfin détailler les résultats obtenus dans des conditions très défavorables, à savoir un défaut léger de la
20 gaine 10 d'un câble aérien 1', répondant au modèle illustré par la figure 5c. En outre, on suppose que le sol est sec, que l'air est non saturé d'humidité et que le défaut, par hypothèse léger, présente une faible conductance. De façon plus précise, les hypothèses sont les suivantes : défaut de
25 1 cm à 100 m, avec la conductivité du défaut $\sigma_{\text{défaut}} = 0,0001$, de l'air $\sigma_{\text{air}} = 0,1$, et du sol $\sigma_{\text{sol}} = 0,01$. Malgré ces conditions tout à fait défavorables, il subsiste un signal faible mais exploitable.

La figure 9 illustre l'intercorrération
30 différentielle du signal mesuré en entrée du câble 1. Il est à noter que la vitesse de propagation de l'onde est plus

importante dans le cas d'un câble aérien que dans le cas d'un câble enterré.

Bien qu'utile dans le cas d'un milieu ambiant dit "idéal" (c'est-à-dire non bruité), le traitement 5 mathématique s'avère pratiquement indispensable dans le cas d'un milieu bruité, en tout état de cause s'il s'agit d'un milieu fortement bruité.

Là encore, ces conditions défavorables peuvent être simulées sur les modèles qui ont été précédemment définis 10 dans le cadre du procédé selon l'invention. On peut en effet, à l'aide du logiciel de simulation utilisé, par exemple le logiciel de traitement mathématique du signal "MATHLAB" précité, additionner du bruit, par exemple du bruit dit "blanc", ce en proportion plus ou moins 15 importante.

Différents niveaux de bruit ont été simulés. Les expérimentations menées par la Demanderesse ont montré que même lorsque l'écho est noyé dans un bruit cent fois, voire dans les cas extrêmes mille fois plus important que lui-même, 20 l'extraction de l'information utile (échos) est encore possible. A titre d'exemple, on va décrire en regard des figures 10a et 10b, le cas extrême d'un signal très fortement bruité.

On suppose que le défaut 14 a une longueur de 10 cm 25 et se trouve à 100 mètres de l'entrée du câble 1 et que le paramètre σ_d est égal à l'unité. On se place dans le cas d'un câble enterré dont le modèle est décrit par la figure 5a. Le signal injecté et l'écho devraient être théoriquement similaires à ce qui est illustré par la 30 figure 7a.

La figure 10a illustre le signal injecté (Gaussienne de 1 V maximum) et l'écho correspondant. Ces signaux sont

30

tout à fait invisibles, car ils sont entièrement noyés dans le bruit : le rapport signal sur bruit est d'environ 1/1000.

De façon avantageuse, pour extraire le signal utile, le traitement est effectué en deux étapes :

- 5 - étape 1 : Moyenne sur plusieurs mesures bruitées, par exemple 50 mesures ;
- étape 2 : Intercorrélation sur le signal ainsi "filtré".

L'opération intercorrélation permet, malgré le bruit, de localiser le défaut 14, comme le montre la figure 10b. Il apparaît, sur cette figure, des "raies" parasites, mais il existe des pics exploitables correspondants au signal injecté, C^{"1}, et aux signaux d'échos, C^{"2}, utiles pour la localisation du défaut 14. En outre, il est possible d'améliorer ce résultat en augmentant le nombre de mesures 15 successives sur lesquelles on effectue une moyenne.

Si on s'éloigne de ce cas extrême, pour des niveaux de bruits moyens (par exemple pour un rapport signal/bruit de l'ordre de 1/100) ou faible, les raies parasites disparaissent, pour ne laisser subsister que les pics 20 correspondant aux échos et au signal injecté (ou aux seuls échos, si on met en oeuvre une méthode différentielle).

On va maintenant décrire, par référence à la figure 11, un exemple de dispositif de localisation de défaut 14, sur un câble métallique multipaires 1, pour la 25 mise en oeuvre du procédé de l'invention.

Dans l'exemple décrit, l'architecture du dispositif de localisation de défaut 14 est bâtie autour d'un micro-ordinateur 40. Le micro-ordinateur 40 pilote un générateur 30 d'impulsion 41, par exemple pour la génération d'une impulsion de forme Gaussienne, dans un mode de réalisation préféré de l'invention. L'impulsion générée est appliquée

entre l'écran électrostatique 11 et le milieu ambiant symbolisé par la terre.

Dans un exemple de réalisation pratique, le générateur 41 peut être constitué par une carte spécialisée insérée dans le micro-ordinateur 40, telle que la carte "Compugen 1100", commercialisée par la société "Le Croy". Elle reçoit donc des instructions élaborées par l'unité centrale du micro-ordinateur 40 sous la conduite d'un programme enregistré. Cette carte 41 génère toute forme d'onde à partir du contenu d'une mémoire (par exemple de capacité 16×10^6 mots de 12 bits) connectée à l'entrée d'un convertisseur numérique-analogique (non représenté).

La résolution temporelle est de 12,5 ns (80 MHz) et la résolution en amplitude est de 4096 points (12 bits).

La forme, la durée et l'amplitude de l'impulsion générée sont fonction, notamment, des caractéristiques connues du câble 1 et de sa configuration (enterrée, enterrée en canalisation ou aérien).

Dans la pratique, il s'agit de générer une impulsion électrique démarrant à 0 Volt pour $t = 0$ dont les caractéristiques ont été décrites en regard de la figure 6.

Les impulsions électriques correspondant, d'une part, à l'impulsion injectée en entrée du câble 1 et, d'autre part, aux échos produits par le ou les défauts 14 le long du câble 1 sont numérisées par deux cartes spécialisées supplémentaires, sous la référence unique 42, par exemple du type "CompuScope 8012/PCI", également commercialisées par la société "Le Croy". Ces cartes 42 effectuent l'acquisition en temps réel des signaux présents en entrée de câble 1, par échantillonnage, de façon à réaliser la conversion inverse : analogique-numérique. La période d'échantillonnage est

de 12,5 ns. Les cartes 42 sont également insérées dans le micro-ordinateur 40.

Le micro-ordinateur 40 exécute par ailleurs, sous la conduite de programmes enregistrés tous les traitements 5 mathématiques nécessaires, notamment les opérations d'autocorrélation ou d'intercorrélation (par exemple sous la conduite du logiciel "MATHLAB" précité ou d'un logiciel similaire) et élabore les instructions nécessaires au bon fonctionnement de la carte de génération d'impulsions 41 et 10 des cartes d'acquisition de signaux 42.

Les signaux acquis et analysés, après traitement mathématique éventuel, sont stockés dans des organes de mémorisation classiques associés à l'unité centrale du micro-ordinateur 40 (mémoire vive et/ou mémoire de masse) et 15 sont affichés sur l'écran 400 du micro-ordinateur 40, en temps réel ou en différé.

Le procédé selon l'invention qui vient d'être décrit dans ses différentes variantes, et notamment celles faisant appel à un post-traitement mathématique, permet de localiser 20 un défaut avec une grande précision, même si le défaut est ténu et si le câble est plongé dans un milieu bruité. Cependant, dans certaines configurations, il subsiste une incertitude qui peut être considérée comme trop importante. Notamment, pour des configurations de câble enterrés, telle 25 la configuration décrite en regard de la figure 5a (qui se modélise par la figure 5b), il est extrêmement important que la localisation du défaut le long du câble soit la plus précise possible. Dans ce cas, il est en effet nécessaire de déterrer le câble pour procéder à des réparations. On 30 conçoit aisément que cette opération nécessite des moyens importants et se révèle onéreuse.

Aussi, selon une caractéristique supplémentaire de l'invention, une fois la localisation effectuée selon les

étapes principales du procédé (mesure de la réflexion du signal injecté et traitement mathématique éventuel du signal mesuré), on peut localiser le défaut de façon plus précise en mesurant le rayonnement électromagnétique du câble 5 lorsqu'on injecte en entrée un signal périodique ou une suite d'impulsions qui vont se propager le long du câble.

Les figures 12a et 12b illustrent de façon schématique cette variante complémentaire du procédé selon l'invention.

10 On a supposé, comme le montre plus particulièrement la figure 12a, que le câble 1 était du type enterré (voir figures 5a et 5b) et qu'il présentait un défaut 14 de longueur déterminée $l'd$. De façon pratique, la détermination de la position du défaut 14 s'effectue avec une précision 15 finie. Si L est la position exacte du centre du défaut 14 par rapport à l'entrée (arbitrairement $X = 0$ sur l'axe des abscisses représenté sur la figure 12b), la distance mesurée est égale à $L \pm [l'd/2]$. La valeur de $l'd$ est en général faible (par exemple de l'ordre de 10 cm), $l'd$ représente 20 donc la zone d'incertitude sur la localisation exacte du défaut 14, suivant une direction parallèle au câble 1.

Pour réduire la longueur $l'd$ de la zone d'incertitude, on injecte en entrée du câble 1 des signaux électriques, par exemple impulsifs, et on mesure le 25 rayonnement électromagnétique H émis par le câble 1.

De façon plus précise, une fois les premières étapes du procédé effectuées et la localisation du défaut 14 acquise avec la précision rappelée ci-dessus ($L \pm [l'd/2]$), on envoie sur place une équipe d'intervention symbolisée, 30 sur la figure 12a, par un opérateur unique Op. Celui-ci est muni d'un appareil mobile 5 de mesure du rayonnement électromagnétique H et se déplace dans la zone où le câble 1 comporte un défaut 14.

L'appareil de mesure 5 comprend essentiellement une antenne 50 située en partie inférieure de celui-ci et qui peut donc se déplacer parallèlement à la surface du sol Ss. L'appareil comprend un boîtier électronique 51 muni de 5 circuits électroniques classiques recevant les signaux issus du rayonnement électromagnétique H capté par l'antenne 50. Le boîtier 51 comprend divers autres organes et plus particulièrement un écran de visualisation 54. Une structure mécanique tubulaire 52 assujettit l'antenne 50 au boîtier 10 électronique 51. L'antenne 50 peut être fixe (avantageusement inclinée par rapport à la structure tubulaire 52, pour des raisons d'ergonomie) ou avoir une inclinaison ajustable (à l'aide d'une rotule ou d'un organe similaire). La structure tubulaire 52 est avantageusement 15 munie de poignées 53, par exemple du type "guidon", ou de tout autre organe de préhension, ce qui permet à l'opérateur de tenir fermement l'appareil 5 à la main, de le déplacer, et de maintenir l'antenne 50 parallèle à la surface du sol Ss.

20 Lorsque l'opérateur Op se trouve à proximité du câble 1, juste à la verticale de celui-ci, le signal capté est maximum. Lorsqu'il s'en éloigne, le signal capté décroît. L'opérateur Op peut donc localiser le passage du câble 1 et, ensuite, suivre un chemin parallèle à celui-ci.

25 Le diagramme sur la partie inférieure de la figure 12b illustre la variation de l'amplitude du signal reçu en fonction de l'éloignement de l'entrée du câble 1 : courbe C₃ représentant l'amplitude du rayonnement électromagnétique H en fonction de l'abscisse X. La 30 décroissance régulière de l'amplitude de H est due à l'affaiblissement naturel des signaux électriques injectés en entrée lors de leur propagation le long du câble 1.

Par contre, à proximité immédiate du défaut 14, le signal reçu, comme illustré sur la courbe C₃, présente une

discontinuité importante qui se traduit par une augmentation brutale de l'amplitude du signal capté, suivie d'une décroissance tout aussi rapide. Ce pic H_p , centré sur le défaut 14, est très localisé, ce qui permet une grande 5 sélectivité. C'est cette discontinuité qui est détectée lors du déplacement de l'appareil 5. L'opérateur Op peut ainsi localiser très précisément l'endroit du défaut. Il suffit ensuite de creuser le sol à cet endroit, et seulement à cet endroit, pour déterrre le câble.

10 En résumé, la phase localisation plus précise du défaut 14 comprend les étapes suivantes :

- a/ injection d'un signal électrique en entrée du câble 1 ;
- b/ localisation du passage du câble par "accrochage" 15 sur le rayonnement électromagnétique émis par celui-ci ;
- c/ localisation précise de la position du défaut 14 (au niveau du sol S_s) par la détection de la discontinuité précitée.

Les signaux captés sont traités par des circuits 20 électroniques de réception (circuits d'adaptation, d'amplification et éventuellement de numérisation) couplés à l'antenne 50 et compris dans le boîtier 51. Une fois traités, les signaux sont transmis à l'organe de visualisation 54, pour être affichés sous toute forme 25 adaptée : courbe, affichage numérique, etc. L'organe de visualisation 54 peut éventuellement être couplé à un dispositif sonore, dont l'intensité du son émis est, par exemple, proportionnelle à l'amplitude du champ électromagnétique mesuré.

30 Bien que l'on ait référencé différemment le dispositif d'injection de signal en entrée de câble (référence 4'), on peut utiliser, a priori, un dispositif

très similaire sinon identique au dispositif 4 de la figure 11. Il peut cependant être nécessaire de prévoir des circuits électroniques complémentaires pour accommoder les spécificités de la variante du procédé selon l'invention qui 5 vient d'être décrite. Le choix de tels circuits est à la portée de l'Homme de Métier.

De Même, il est généralement nécessaire de coordonner les opérations effectuées en entrée du câble 1 et celles effectuées sur le terrain par l'opérateur Op. ceci 10 peut être réalisé manuellement ou automatiquement. Dans les deux cas, il y lieu de prévoir des moyens de transmission de données (non représentés), qui peuvent être intégrés ou non dans le boîtier électronique de l'appareil 5. Ce dernier est naturellement muni d'un dispositif d'alimentation autonome 15 (piles, batteries, etc.). Il peut enfin comprendre, outre les circuits électroniques de réception précités, une unité de traitement de données numériques autonome, associée à des périphériques tels que lecteur de disquettes, clavier intégré, mémoire de masse, etc. Tous ces circuits peuvent 20 être avantageusement logés dans le boîtier 51.

De façon habituelle en soi, l'appareil de mesure 5 peut comprendre plusieurs échelles de sensibilité commutables, la sensibilité maximale étant utilisée pour "s'accrocher" sur le rayonnement électromagnétique du 25 câble 1 et le localiser.

Enfin, bien que l'on ait considéré le seul cas d'un câble enterré, la variante du procédé qui vient d'être décrite peut s'appliquer à d'autres configurations de câbles, notamment à des câbles sous conduite. Il est 30 naturellement nécessaire que le matériau de la conduite soit perméable aux ondes électromagnétiques, ce qui est le cas d'une conduite en matériau plastique.

A la lecture de ce qui précède, on constate aisément que l'invention atteint bien les buts qu'elle s'est fixés.

Il doit être clair cependant que l'invention n'est pas limitée aux seuls exemples de réalisations explicitement 5 décrits, notamment en relation avec les figures 3 à 12b.

En particulier, les exemples numériques n'ont été donnés que pour mieux préciser les caractéristiques principales du procédé selon l'invention. Bien que particulièrement adaptée, par ces propriétés spécifiques, 10 les impulsions de type Gaussien ne sont pas les seules utilisables dans le cadre de l'invention, comme il a été indiqué. En outre, la durée et l'amplitude de l'impulsion injectée sur l'écran électrostatique sont fonction des caractéristiques du câble métallique multipaires, de sa 15 configuration et, éventuellement, des caractéristiques du milieu ambiant (humidité, etc.).

L'appareil de test permettant la localisation du défaut le long du câble n'est pas non plus limité au seul dispositif illustré en regard de la figure 11, dont 20 l'architecture est basée sur un micro-ordinateur universel, complété par des cartes de circuits électroniques spécialisés. On peut notamment réaliser un appareil de mesure spécifique, avantageusement portatif. De même, les opérations de traitement de signaux, notamment les 25 autocorrélations ou intercorrélations peuvent être effectuées par des circuits électroniques spécialisés, et non par des logiciels comme il a été décrit, sans sortir du cadre de l'invention.

On peut également adjoindre au micro-ordinateur 40, 30 de façon classique, une imprimante ou un traceur de courbes pour l'impression des graphiques obtenus, par exemple sur du papier millimétré.

38

Enfin, le câble peut présenter, non pas un seul défaut, mais plusieurs. On obtiendra alors plusieurs séries d'échos étagés dans le temps, ce qui permettra de discriminer les différentes positions de défauts.

RENDICATIONS

1. Procédé de localisation d'au moins un défaut (14) le long d'un câble métallique multipaires (1), ledit câble comprenant une pluralité de paires de fils conducteurs (12) destinées à véhiculer des signaux d'information, un écran électrostatique (11) conducteur de l'électricité entourant ces paires (12) et une gaine externe (10) en matériau électriquement isolant, ledit câble (1) étant plongé dans un milieu déterminé (Mat), caractérisé en ce qu'il comprend au moins les étapes suivantes :

- génération (41) d'une impulsion électrique, de forme, d'amplitude et de durée déterminées ;
- injection de cette impulsion, en une première extrémité dudit câble (1), entre ledit écran électrostatique (11) et le matériau constituant ledit milieu déterminé (Mat), de manière à obtenir la propagation d'une onde électromagnétique le long dudit écran électrostatique (11) ;
- analyse temporelle des signaux électriques apparaissant à ladite première extrémité du câble (1), sur une période déterminée, pour détecter la présence d'échos correspondant à des réflexions de ladite onde électromagnétique sur ledit défaut (14), ce défaut se traduisant par des interactions entre ledit écran (11) électrostatique et ledit milieu déterminé (Mat) ;
- et détermination de la distance séparant ledit défaut (14) de ladite première extrémité de câble (1) à partir du temps nécessaire à ladite onde électromagnétique pour se propager jusqu'au dit défaut et retourner à ladite première extrémité et de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le câble (1).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend une phase préliminaire consistant à créer des modèles (Most, Mosc, Mosa) décrivant les caractéristiques électromagnétiques dudit câble métallique multipaires (1) et dudit défaut (14), et à acquérir des données décrivant son comportement lors de l'injection de ladite impulsion électrique en présence de défauts simulés, de caractéristiques variables, et en ce que chacun desdits modèles (Most, Mosc, Mosa) est attaché à une configuration dite standard du câble (1) et à des conditions caractéristiques dudit milieu déterminé (Mat, Mae, Maar).

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit câble (1) décrit par lesdits modèles comprend ledit écran électrostatique (11), celui-ci entourant un matériau diélectrique (13), ladite gaine externe (10) et ledit milieu déterminé (Mat, Mae, Maar), et en ce que ledit défaut (14) est modélisé par des modifications des caractéristiques de conductivité et de permittivité du matériau isolant de la gaine externe (10) entraînant une interaction entre ladite onde électromagnétique se propageant le long dudit écran électrostatique (11) et ledit milieu déterminé (Mat, Mae, Maar) dans lequel est plongé le câble (1).

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'un premier desdits modèles standards (Most), est associé à une configuration de câble métallique multipaires enterré (1), à une profondeur déterminée (1), par rapport à la surface du sol (Ss), et en ce que ledit milieu déterminé (Mat) est de la terre.

5 5. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'un premier desdits modèles standards (Mos_C) est associé à une configuration de câble métallique multipaires (1) sous conduite (2) en matériau plastique, et en ce que ledit milieu déterminé (Mae) est de l'eau remplissant la conduite (2).

10 6. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce qu'un premier desdits modèles standards (Mosa) est associé à une configuration de câble métallique multipaires aérien (1'), ledit câble étant retenu, par un filin porteur (3), à une hauteur déterminée (h), par rapport à la surface du sol), et en ce que ledit milieu déterminé (Maar) est de l'air (Maar), à un taux d'humidité déterminé.

15 7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 6, caractérisé en ce que ladite impulsions électriques est une impulsions de forme gaussienne, et en ce que les caractéristiques électriques de cette impulsions et ladite vitesse de propagation sont déterminées à partir de l'un desdits modèles standards (Mat, Mae, Maar) et desdites données acquises.

25 8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que lesdits signaux électriques apparaissant à ladite première extrémité du câble (1) étant entachés de bruit, il comprend une étape supplémentaire consistant à soumettre ces signaux à un traitement mathématique et en ce que ce traitement mathématique comprend une opération d'intercorrélation, de manière à les extraire dudit bruit.

30 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une phase

supplémentaire permettant de rendre plus précise ladite localisation de défaut (14) et comprenant au moins les étapes suivantes :

- 5 a/ injection d'un signal électrique en une première extrémité (4') dudit câble (1), ce signal occasionnant un rayonnement électromagnétique (H) tout au long du câble (1), ledit rayonnement (H) présentant une discontinuité locale (H_p) de son amplitude dans une zone centrée sur le défaut (14) ;
- 10 b/ et localisation plus précise dudit défaut (14) par détection de la position, le long du câble (1), de ladite discontinuité (H_p) de rayonnement électromagnétique (H).

15 10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que, ledit câble (1) étant du type enterré, ladite phase supplémentaire comprend une étape intermédiaire consistant en la localisation du passage du câble (1) par la détection dudit rayonnement électromagnétique (H).

20 11. Dispositif pour la mise en oeuvre du procédé de localisation de défaut selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (41) de génération d'une impulsions de forme, d'amplitude et de durée déterminées, et d'injection de cette impulsions, en une première extrémité dudit câble (1), entre ledit écran électrostatique (11) et le matériau constituant ledit milieu déterminé (Mat, Mae, Maar), des moyens (42) d'acquisition en temps réel des signaux électriques apparaissant à ladite première extrémité du câble (1), sur une période déterminée, et des moyens (40) de commande et de calcul, à logique programmée, pour effectuer une analyse temporelle de ces signaux, de manière à détecter la présence d'échos correspondant à des réflexions de ladite onde électromagnétique dues à au

moins un défaut (14) et à localiser ce défaut (14) le long dudit câble (1), et en ce que lesdits moyens (40) de commande et de calcul à logique programmée comprennent un écran de visualisation (400) pour l'affichage desdits échos.

5

12. Dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce que lesdits moyens de commande et de calcul à logique programmée sont constitués par un micro-ordinateur (40) et lesdits moyens de génération d'impulsion (41) et 10 d'acquisition (42) par des cartes de circuits électroniques spécialisées, incluses dans ledit micro-ordinateur (40).

15

13. Dispositif selon les revendications 11 ou 12, caractérisé en ce qu'il est associé en outre à un appareil de mesure mobile (5) de champ électromagnétique (H) rayonné par ledit câble (1) et occasionné par l'injection d'un signal électrique en une première extrémité du câble (1), ledit appareil de mesure (5) étant destiné à être déplacé le long du câble (1) et à détecter des discontinuités (H_P) de l'amplitude dudit champ électromagnétique (H) dues auxdits défauts (14), de manière à localiser ces défauts (1) avec une précision améliorée.

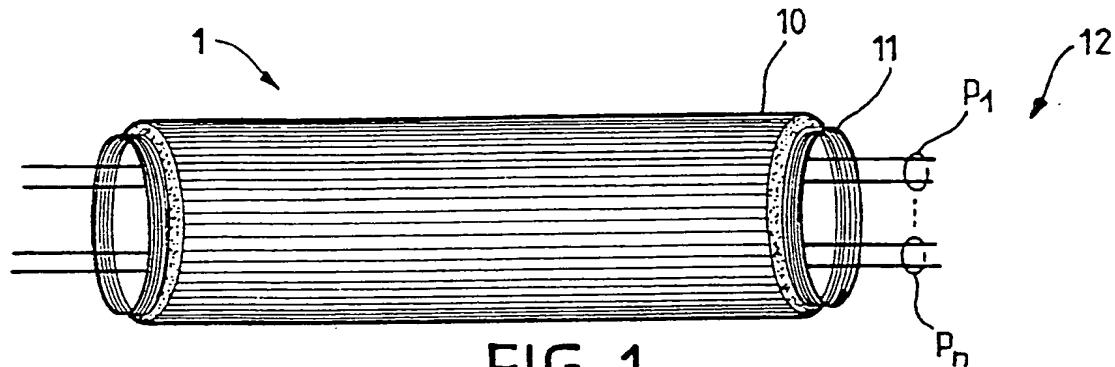
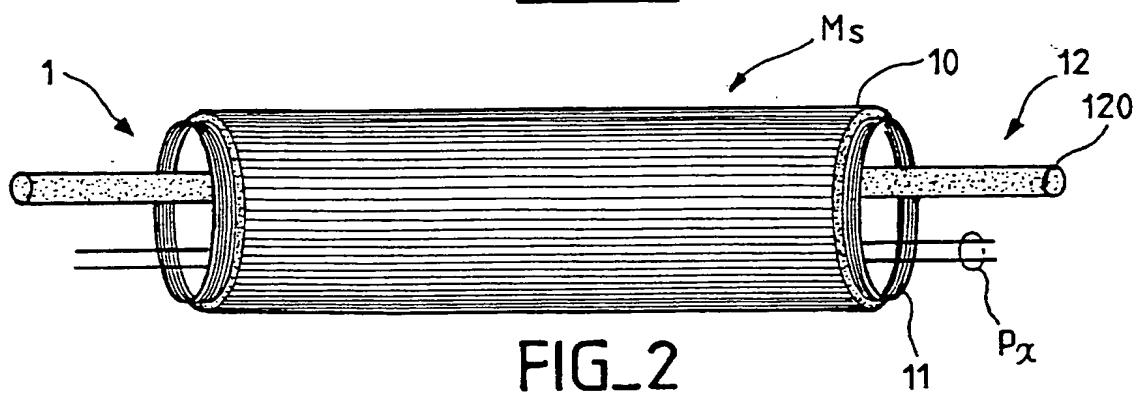
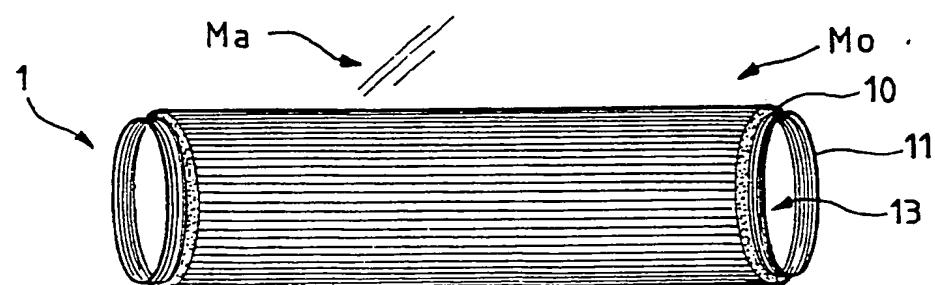
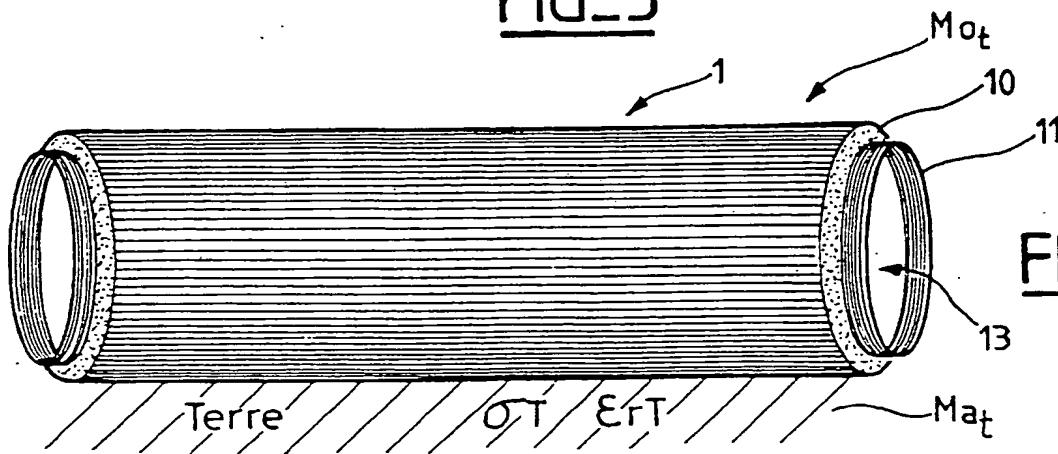
20

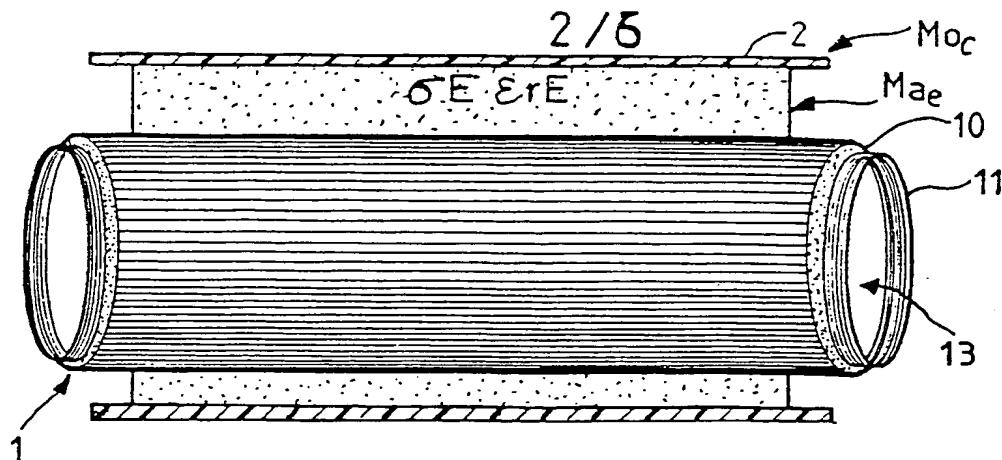
25

14. Dispositif selon la revendication 13, caractérisé en ce que ledit appareil de mesure (5) comprend au moins une antenne (50) sensible audit rayonnement électromagnétique (H), un organe de visualisation (54), des circuits électroniques, compris dans un boîtier (51), transformant le rayonnement électromagnétique capté (H) en 30 signaux électriques affichables sur ledit organe de visualisation (54) et une structure mécanique (52)

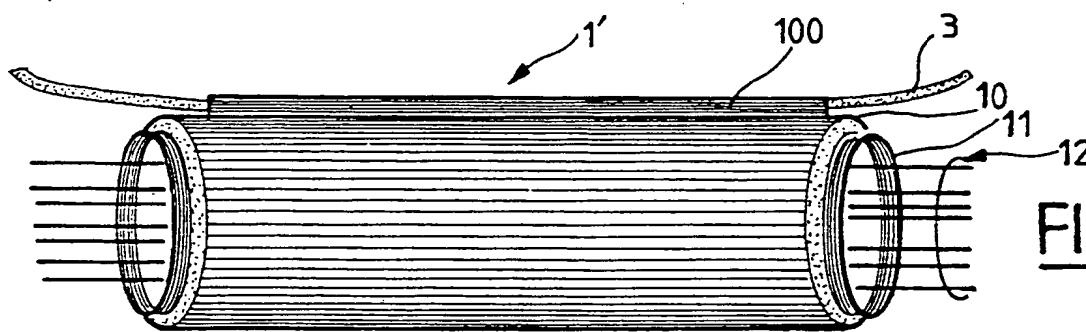
supportant ledit boîtier (51), l'organe de visualisation (54) et ladite antenne, ladite structure mécanique étant munie d'organes de préhension (53) permettant à un opérateur (Op) de déplacer à la main ledit appareil de mesure (5).

1/5

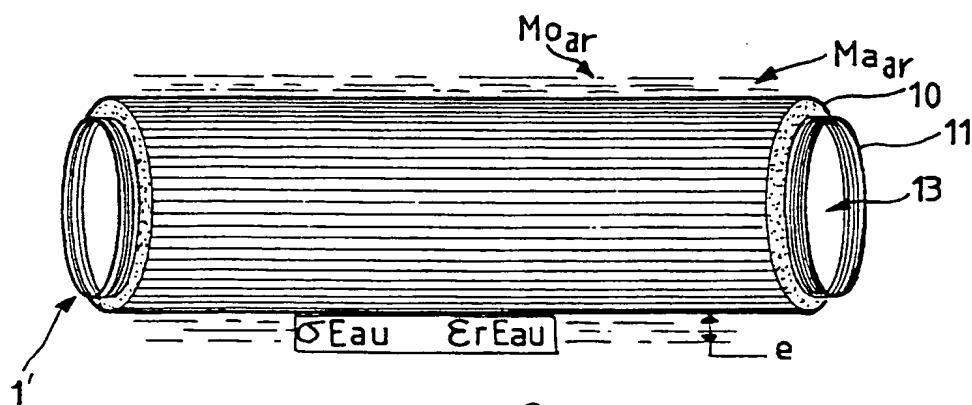
FIG_1FIG_2FIG_3FIG_4a



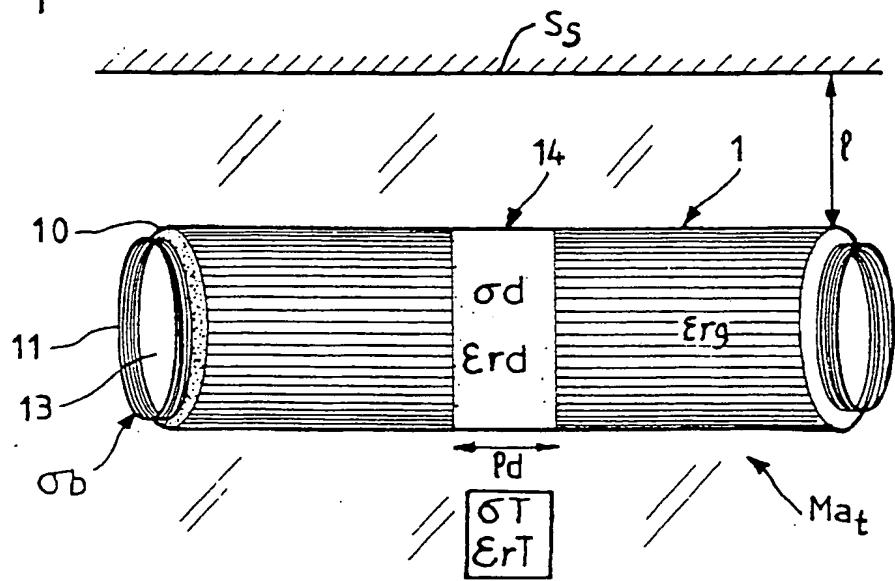
FIG_4b



FIG_4c

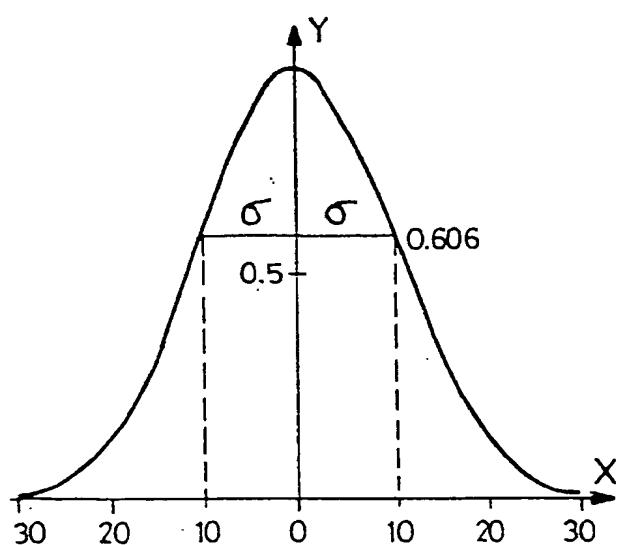
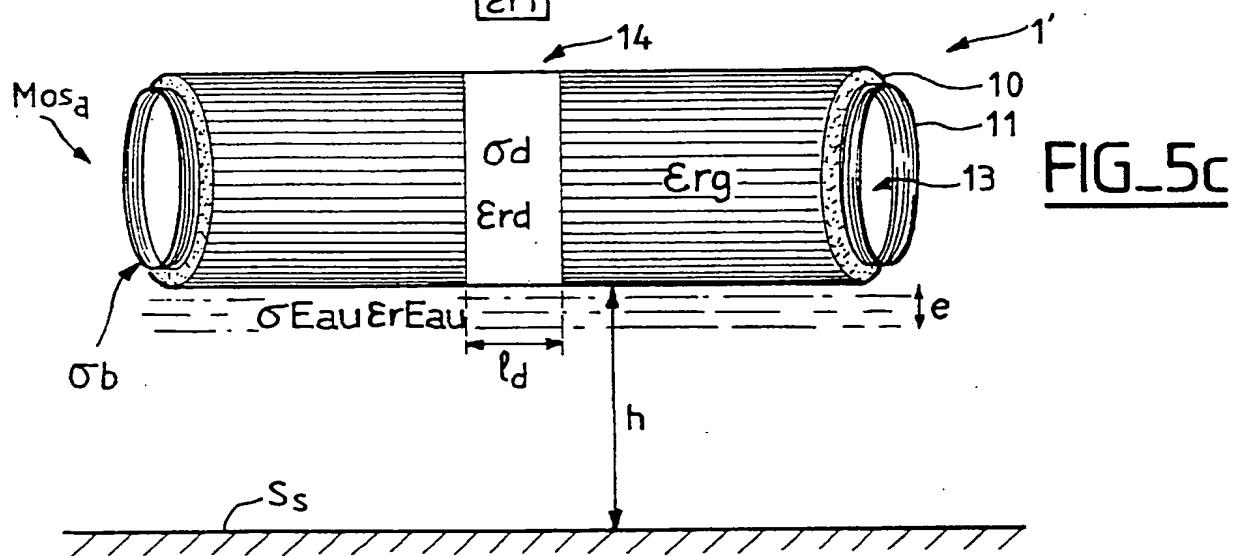
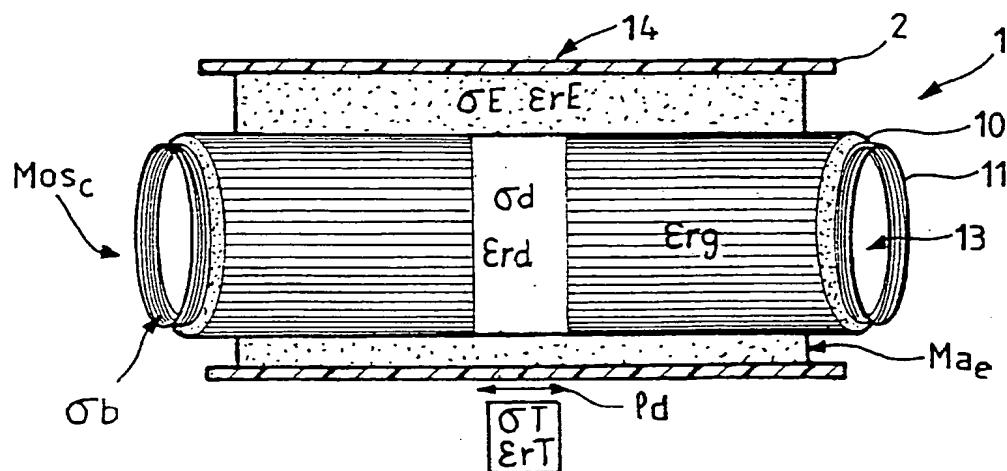


FIG_4d

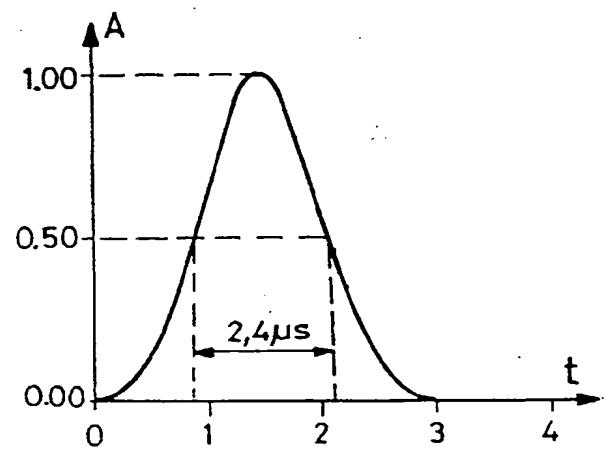


FIG_5a

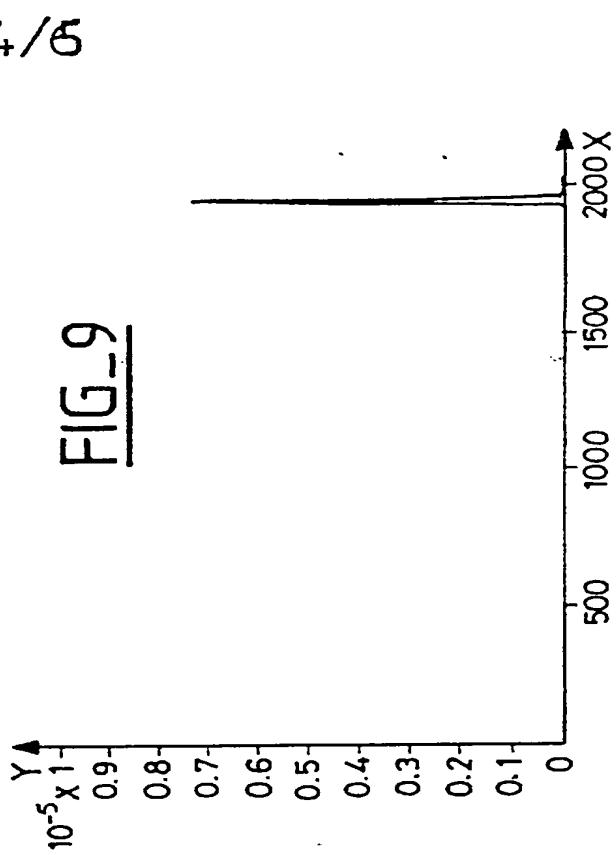
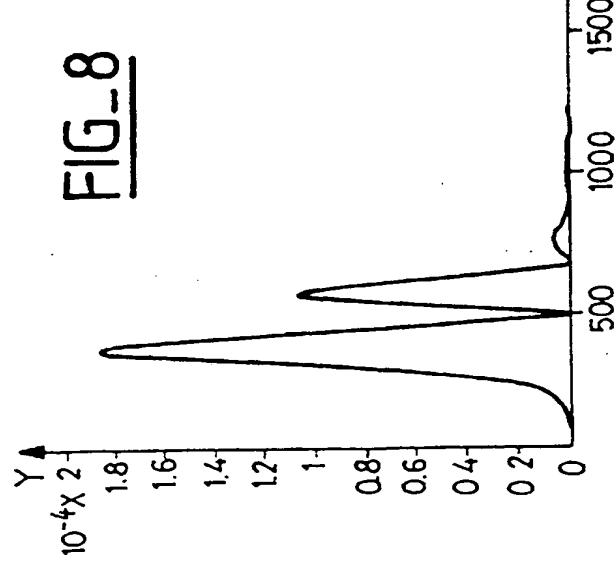
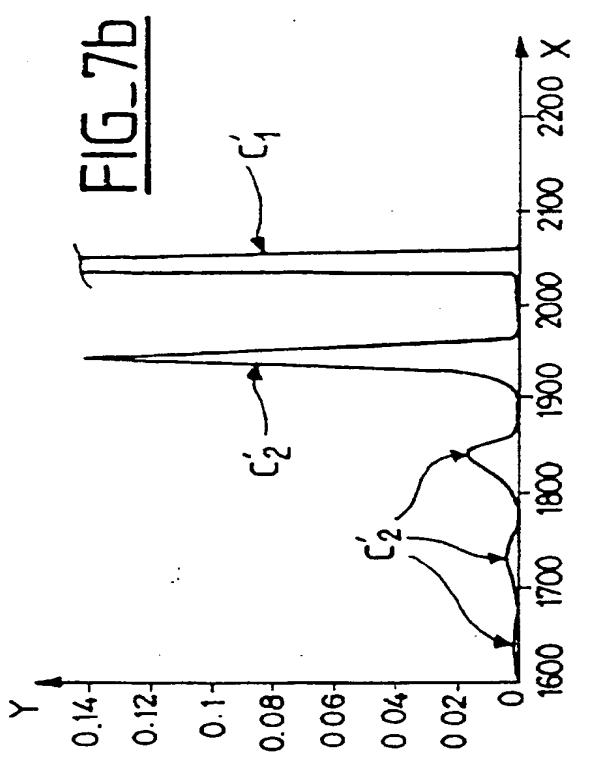
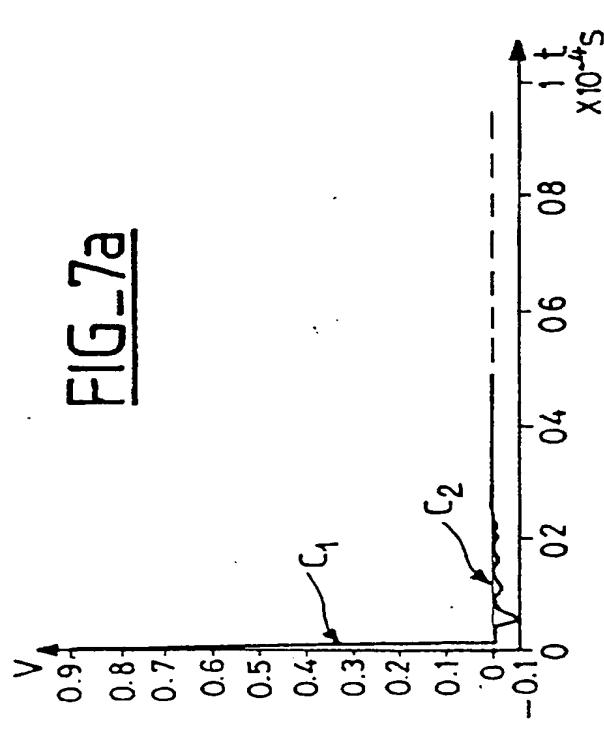
3/5



FIG_6a

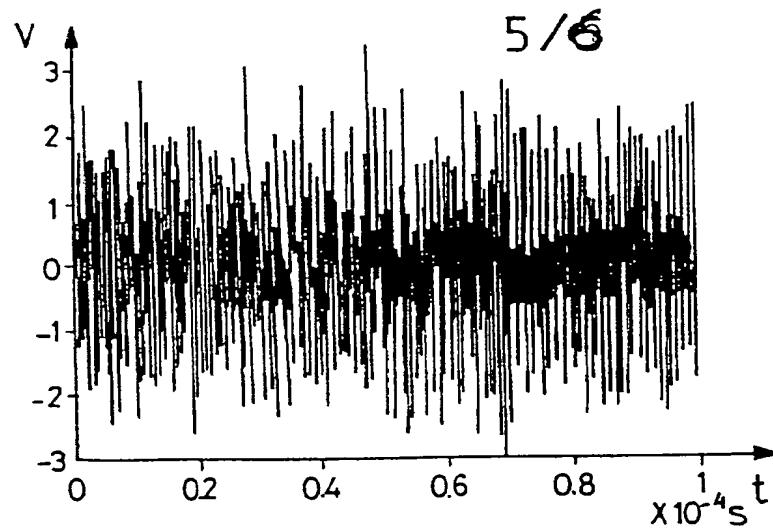


FIG_6b

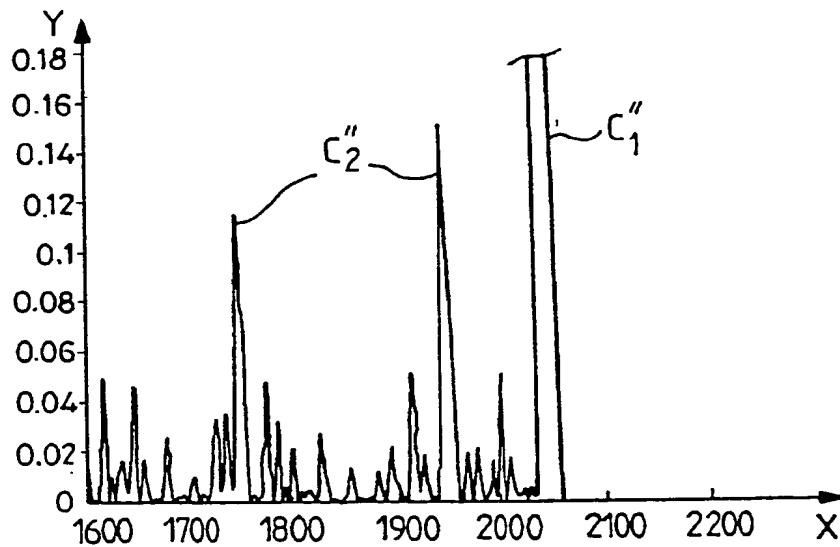


4/6

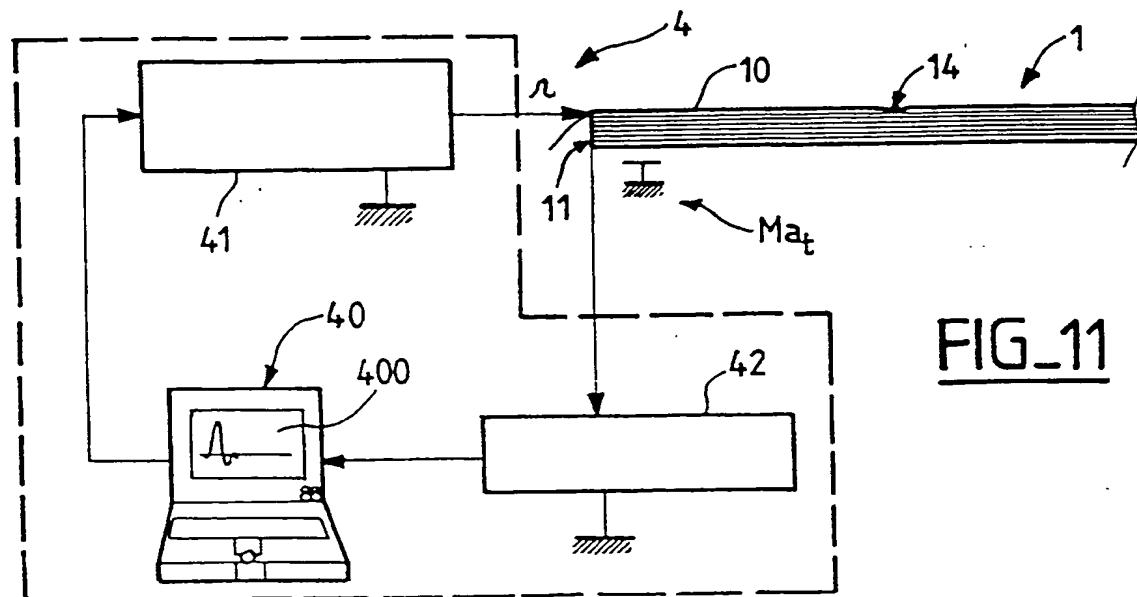
2766274



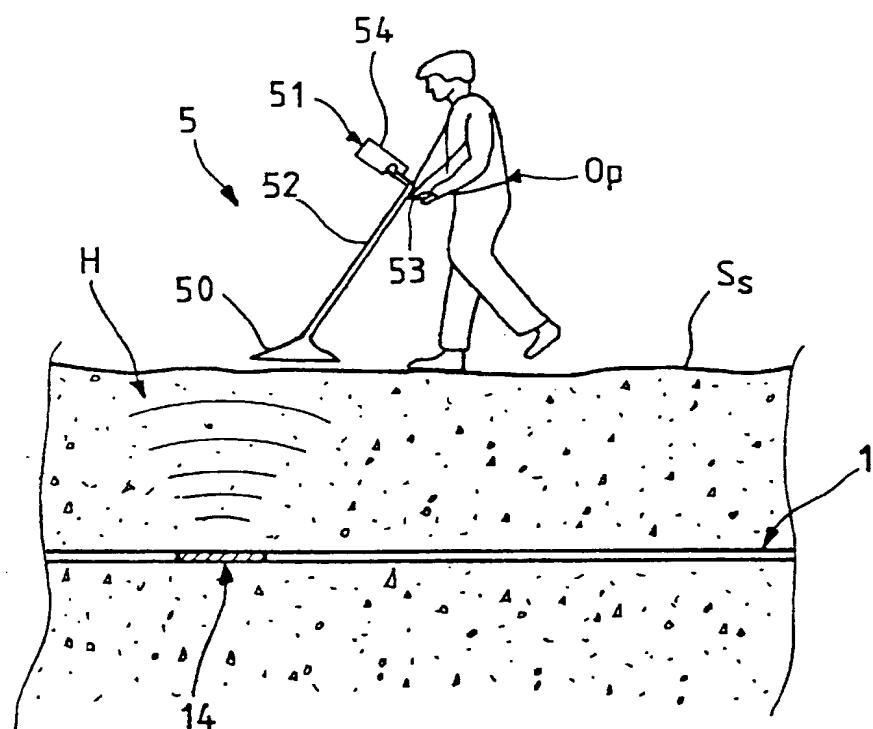
FIG_10a



FIG_10b



6/6

FIG_12aFIG_12b